

USO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS E ANALÍTICOS PARA DETERMINAR A VARIÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM OSCILADOR EM ANEL ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES SPICE

CAROLINE PINHEIRO GARCIA¹; THIAGO HANNA BOTH²

¹Universidade Federal de Pelotas – caroline.garcia@ufpel.edu.br

²Universidade Federal de Pelotas – thboth@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Por apresentarem diversificada gama de aplicações, os osciladores em anel são amplamente utilizados na área de microeletrônica, representando um dos circuitos integrados mais fabricados da atualidade (KUMAR et al., 2012).

São circuitos implementados com base em um número ímpar de inversores lógicos, nos quais o nível da tensão de saída é oposto ao da entrada. Ao conectá-los entre si, forma-se um circuito instável, com realimentação negativa, funcionando de acordo com o critério de Barkhausen BOYLESTAD; NASHELSKY (2008).

Como indicado por MANDAL; SARKAR (2010), os comportamentos oscilatórios obtidos com osciladores em anel, possuem aplicações em diferentes tipos de sistemas eletrônicos, utilizados em sistemas de rádio e comunicação, assim como em sistemas de eletrônica digital. Neste último, são utilizados como sinal de sincronia, ou sinal de relógio (em inglês, *clock signal*).

Além disso, como apontado em KUMAR et al. (2012), são constantemente empregados em *wafers* de silício pelas indústrias de semicondutores para monitoração de parâmetros como a potência e os tempos de atraso de propagação, assim como a frequência de operação de inversores da tecnologia CMOS, construída a partir de pares complementares de transistores MOSFETs.

Nesse contexto, torna-se importante a compreensão dos osciladores em anel. Desta forma, o trabalho visa apresentar o estudo do comportamento probabilístico destes circuitos quando variações independentes do tempo são incorporadas em sua tensão de alimentação, com o uso de métodos analíticos e estatísticos, obtidos através de simulações SPICE. O trabalho faz parte do estudo de metodologias e ferramentas de simulação para a estimativa da confiabilidade de circuitos integrados baseados na tecnologia metal-óxido-semicondutor (MOS), considerando o impacto de efeitos responsáveis pela degradação e pelo envelhecimento desses dispositivos com o decorrer do tempo.

2. METODOLOGIA

Através de revisões bibliográficas e de métodos estatísticos e analíticos, realizou-se o estudo e o desenvolvimento de um oscilador em anel com 13 estágios, baseando-se na utilização de 13 inversores lógicos projetados com tecnologia CMOS, como apresentado na Figura 1.

Inicialmente, dispendo-se do oscilador em anel, foram realizadas 1000 simulações elétricas de Monte Carlo utilizando o simulador de código aberto NGSpice (NGSPICE, 2021), modelos de transistores da tecnologia PTM 130nm (PTM, 2021) e variações de tensão de limiar normalmente distribuídas.

Como apresentado em METROPOLIS; ULAM (1949), o método de Monte Carlo é uma abordagem estatística utilizada para o estudo de diferentes problemas,

principalmente em aproximações não lineares. Nele, são realizadas diversas simulações com a produção de valores aleatórios, que permitem compreender o comportamento estatístico de um processo.

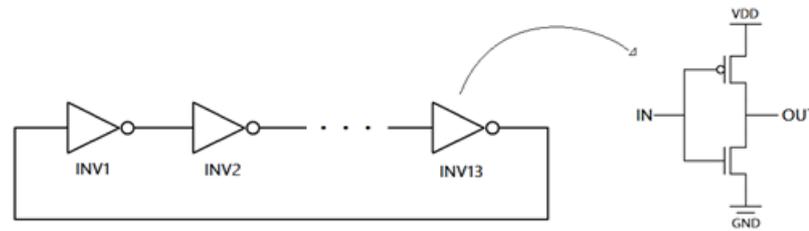


Figura 1: Oscilador em Anel de 13 estágios com tecnologia CMOS.

Dessa forma, para cada simulação efetuada, geram-se respostas diferentes, formando um conjunto de dados do qual serão extraídas as duas propriedades estatísticas necessárias para o estudo, sendo elas: a média e o desvio padrão para o período do oscilador em anel.

Na sequência, o comportamento do circuito é analisado combinando-se técnicas de propagação de incertezas e de análise de sensibilidade. Sabendo-se que transistores MOS são dispositivos não lineares, como apontam RABAEY et al. (2003), fez-se uso da Propagação de Incertezas para combinações não lineares com análise de sensibilidade, quando o sistema é submetido a diferentes perturbações. Com isso, consideram-se as incertezas relacionadas às restrições existentes quando os parâmetros são medidos, que se propagam por toda a análise. A técnica utilizada para o estudo baseia-se no uso de coeficientes de sensibilidade, que descrevem a variabilidade quando perturbações são aplicadas (BIPM, 2008).

A Propagação de Incertezas, combina aproximações analíticas e estatísticas. Para isso, faz-se uso de um único inversor CMOS, com valores extraídos a partir de 1000 simulações Monte Carlo, considerando transistores PTM 130nm. Dessa forma, são extraídos a média e o desvio da amostra dos atrasos de propagação, parâmetros aplicados na Equação 1, utilizada para determinar o desvio padrão do período do oscilador em anel.

$$\sigma_T = \sqrt{n \cdot \frac{\partial T^2}{\partial T_{LH}} \cdot \sigma_{LH}^2 + n \cdot \frac{\partial T^2}{\partial T_{HL}} \cdot \sigma_{HL}^2} \quad (1)$$

Onde n representa o número de estágios do oscilador em anel.

Combinando-se esta metodologia com análise de sensibilidade, a aproximação com a propagação de erros é feita, em sua maior parte, de modo analítico. Ainda que alguns parâmetros sejam obtidos com simulações, são análises únicas e determinísticas para o atraso de um inversor, que retornam sempre os mesmos valores quando submetidos à mesma variação de tensão. Assim, coletam-se as informações referentes à média e ao desvio padrão do período, apresentado em função da tensão de limiar, como disposto na Equação 2.

Na análise, também realizada com um inversor CMOS de mesma tecnologia PTM 130nm, considera-se as variações dos pares simétricos para o oscilador em anel de 13 (ou n) estágios.

$$\sigma_T = \sqrt{n \cdot \frac{\partial T^2}{\partial V_{TN}} \cdot \sigma_{V_{TN}}^2 + n \cdot \frac{\partial T^2}{\partial V_{TP}} \cdot \sigma_{V_{TP}}^2} \quad (2)$$

Posteriormente, os dados coletados são apresentados e comparados, levando-se em consideração as diferentes análises.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Baseando-se nas simulações realizadas através da descrição do circuito no simulador, fez-se o estudo dos valores coletados. Inicialmente, o conjunto de dados formado com o método de Monte Carlo foi examinado. Na Figura 2, observa-se o comportamento do circuito. Os resultados levam em consideração variações normalmente distribuídas para a tensão de limiar com desvio padrão de 20mV.

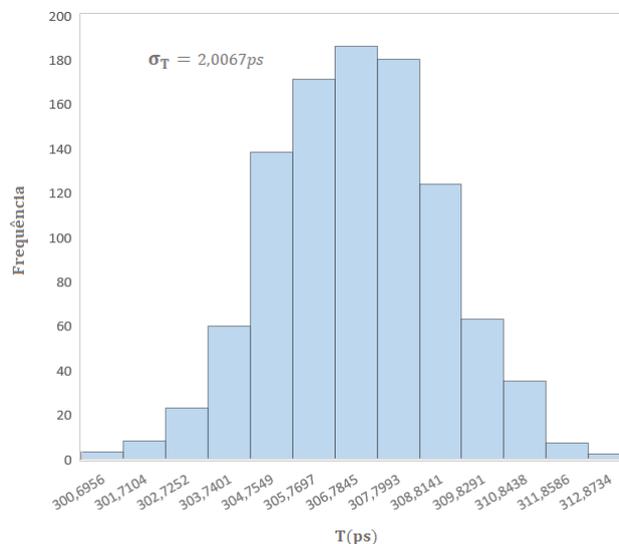


Figura 2: Análise com o Método de Monte Carlo.

Após, foram feitas as análises referentes à segunda etapa do projeto. Nela, tem-se o comportamento do circuito considerando a propagação de erros. O estudo analítico baseia-se na Propagação de Incertezas com análise de sensibilidade e é dividido em duas partes. Os resultados, denominados Propagação de Incertezas (a) e Propagação de Incertezas (b), apresentados na Tabela 1, referem-se aos valores obtidos através da Equação 1 e Equação 2, respectivamente.

Tabela 1: Valores médios e desvios padrões do período do oscilador em anel para diferentes métodos de análise.

Análises	T (ps)	σ_T (ps)
Propagação de Incertezas (a)	273,4711	2,2873
Propagação de Incertezas (b)	271,8344	1,9579
Método de Monte Carlo	306,3121	2,0067

Ps – picossegundos.

Também, na Tabela 1, o comportamento das simulações do método de Monte Carlo é novamente exposto, possibilitando a comparação com os métodos

analíticos. Os dados coletados demonstram a aplicabilidade das descrições matemáticas no estudo do comportamento de circuitos integrados. Com o intuito de reduzir a complexidade e o tempo das simulações computacionais, o comportamento foi aproximado de maneira eficaz quando comparado com o modelo estatístico.

O trabalho, apresenta as investigações iniciais dos impactos causados pelas variações dos dispositivos. Essas, originadas de diferenças no processo de fabricação dos transistores MOS, fazem com que análises sejam necessárias para aproximações de seus valores de operação. Salienta-se, também, a extensão dos conhecimentos apresentados, que podem ser aplicados para análise de portas lógicas mais complexas que, por sua vez, implementam blocos lógicos maiores.

4. CONCLUSÕES

Ao decorrer do trabalho, observa-se a proximidade entre os resultados obtidos com o uso das diferentes técnicas de análise, demonstrando o uso de métodos analíticos no estudo de circuitos integrados, utilizados como ferramenta de auxílio, facilitando os testes em dispositivos. Por fim, em projetos futuros, serão implementadas novas análises, considerando variações que dependem da passagem do tempo. Serão examinados os impactos e as consequências causadas por instabilidades relacionadas ao aprisionamento de cargas elétricas (*charge trapping*) em dispositivos MOS, responsáveis pela redução do tempo de vida útil e que causam o envelhecimento de circuitos integrados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIPM. **International Bureau of Weights and Measures**, 2008. Disponível em: <https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6>. Acessado em: 6 jul. 2021.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. New Jersey: Prentice Hall, 2008.

KUMAR, S.; KAUR, G. Design and performance analysis of nine stages cmos based ring oscillator. **International Journal of VLSI design & Communication Systems (VLSICS)**, [s.l.], v.3, n.3, p.57-69, 2012.

MANDAL, M. K.; SARKAR, B. C. Ring oscillators: Characteristics and applications. **Indian Journal of Pure & Applied Physics**, New Delhi, v.48, n.2, p.136-145, 2010.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. The Monte Carlo Method. **Journal of the American Statistical Association**, [s.l.], v.44, n.247, p.335-341, 1949.

NGSPICE: The open source spice simulator. Version 34. [s.l.]: Open source, 2021. Disponível em: <<http://ngspice.sourceforge.net/>>. Acessado em 21 jun. 2021.

RABAEY, J. M.; CHANDRAKASAN, A. P.; NIKOLIC, B. **Digital Integrated Circuits: A Design Perspective**. New Jersey: Prentice Hall, 2003.

PTM. **Predictive Technology Model**, 2021. Disponível em: <<http://ptm.asu.edu>>. Acessado em: 21 jun. 2021.